

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Яророва Анастасия Дмитриевна

**Исследование взаимодействия массивных звезд
и межзвездной среды в близких
низкометаллических галактиках**

Специальность: 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена на кафедре экспериментальной астрономии физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: **Моисеев Алексей Валерьевич**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Прохоров Михаил Евгеньевич**
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий лабораторией космических проектов Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова
Мурга Мария Сергеевна
кандидат физико-математических наук,
ученый секретарь Института астрономии Российской академии наук
Холтыгин Александр Федорович
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры астрономии математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

Защита состоится 18 декабря 2025 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Университетский пр., д. 13, конференц-зал.
E-mail: dissovet@sai.msu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3538>.

Автореферат разослан 30 октября 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н.

А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность, история и степень разработанности темы

Взаимодействие массивных звёзд ($M > 8M_{\odot}$) с межзвёздной средой (МЗС) играет ключевую роль во многих процессах, происходящих в галактиках, значительно влияя на их морфологию, кинематику и химическую эволюцию. Теоретические представления о влиянии горячих звёзд на окружающий межзвёздный газ были предложены ещё в работе Струве 1939 года [1], в которой он описал образование ионизованных областей водорода вокруг О-звёзд. Массивные звезды оказывают многоступенчатое воздействие на окружающее вещество, начиная с Главной Последовательности (ГП) и вплоть до конечных стадий их эволюции, которые при этом могут значительно различаться в зависимости от начальных параметров звезды. На ранних этапах эволюции звезд наиболее значимым фактором их воздействия на МЗС является ультрафиолетовое излучение (УФ, с длиной волны менее $912\text{\AA}$), обусловленное высокими температурами звезд (более 20 кК , [2]), ионизирующее межзвездный газ. Одновременно с этим массивные звезды производят звездный ветер, способный механически разогнать окружающий газ (для звезд О3-О9 на ГП темп потери массы и терминальная скорость имеют значения $\dot{M} = 10^{-7} - 10^{-5.6} M_{\odot}/\text{год}$, $v_{\infty} = 2500 - 3500 \text{ км/с}$, [3]). В результате совместного действия ультрафиолетового излучения и звездных ветров вокруг массивных звезд формируются протяжённые области ионизованного водорода (далее – области H II).

После схода массивных звезд с ГП, звезда может проходить разные фазы – Красный Супергигант (RSG), Голубой Супергигант (BSG), Желтый Гипергигант (YHG), звезда Вольфа-Райе (WR), Яркая Голубая Переменная (LBV) [4; 5]. Классический сценарий эволюции массивных звёзд был предложен Конти в 1976 году. В своей работе он показал возможную эволюционную связь между звёздами типа О и звёздами Вольфа-Райе (WR), подчеркнув при этом решающую роль потери массы в звездной эволюции. Позже было показано, что последовательность эволюционных стадий сильно зависит от начальной массы и показателя металличности, а также от наличия второго компонента. При этом температуры звезд в разные моменты эволюции могут варьироваться от 4 кК до нескольких сотен кК (последнее – в случае некоторых звезд WR [2]). Влияние ветров массивной звезды на МЗС после схода с

ГП усиливается. Так, темп потери массы звезды на стадии WR при солнечной металличности может достигать значения $\dot{M} = 10^{-4.2} M_{\odot}/\text{год}$ [6]. Поэтому влияние проэволюционировавших массивных звезд на МЗС необходимо учитывать при моделировании процессов звездообразования и построении реалистичных сценариев эволюции галактик. Благодаря воздействию массивной звезды на окружающий газ до взрыва сверхновой снижается плотность околозвездного газа, отчего начало радиативных потерь в остатке сверхновой происходит позже [7]. При этом звездные ветры создают полости размером в десятки парсек внутри областей H II [8].

Завершающей стадией эволюции массивных звезд становится взрыв сверхновой, сопровождаемый выбросом в МЗС колоссального количества энергии и тяжёлых элементов, формирующих расширяющуюся оболочку с ударной волной, сгребаящую окружающий газ и способную оказывать на него влияние на временных масштабах в сотни тысяч лет [9]. Все эти процессы приводят к формированию сложных структур в МЗС родительской галактики — пузырей, оболочек, фронтов ударных волн и конусов утечки ионизирующего излучения. Описанные процессы могут играть стимулирующую роль в последующем звездообразовании. Например, в работах [10; 11] показано, что коллективное действие нескольких поколений O-звезд приводит к образованию газовых оболочек, достигающих нескольких килопарсек в диаметре и вторичному звездообразованию их стенках. Кроме того, совместная деятельность массивных звезд может приводить и к появлению галактических ветров [12] и выбросу газа, обогащенного тяжёлыми элементами, из дисков галактик в окружающую среду — окологалактическую и межгалактическую [13].

Особый интерес в контексте исследований взаимодействия массивных звезд с окружением представляют звезды с низким содержанием металлов, для которых как теоретические, так и наблюдательные исследования предсказывают изменение эволюционного пути и основных параметров. Так, в работах [14; 15] показана сильная зависимость темпа потери массы O- и B-звезд от показателя металличности: темп потери массы уменьшается с уменьшением показателя металличности. Уменьшение скорости потери массы при низкой металличности, в свою очередь, приводит к увеличению остаточной массы и углового момента звезды, поэтому бедные металлами звезды вращаются быст-

рее высокометаллических (см. [16; 17]). Быстрое вращение приводит в свою очередь к тому, что низкометаллические звезды позже сходят с главной последовательности. Кроме того, быстрое вращение звезды приводит к более эффективному перемешиванию вещества внутри нее [18]. В совокупности все эти факторы приводят к изменению в работе обратной связи между звездами и МЗС.

Теоретические представления разных научных групп об эволюции массивных звезд с солнечной металличностью в основном сходятся, в условиях же пониженной металличности такого согласия в настоящий момент нет. Так, например, для звёзд с начальными массами свыше $40M_{\odot}$ эволюционные треки, полученные разными авторами, могут существенно различаться (хорошей иллюстрацией является расхождение в работах [18—21]). В отсутствие достаточных наблюдательных данных, модели массивных звезд опираются на разнообразные предположения и, как результат, предсказывают значения ключевых параметров, значительно отличающиеся друг от друга (например верхнее ограничение на возможную массу звезды, скорость ветра, скорость вращения, темп потери массы). Все эти противоречия приводят к расхождению сценариев эволюции звезд, и, в итоге, к пробелам в представлениях об эволюции газовой среды галактик с пониженной металличностью (в том числе, галактик в ранней Вселенной). При этом выборка массивных звезд на ранних эволюционных стадиях в условиях металличности, более низкой, чем в SMC, на сегодняшний день критически мала (подробно эта проблема освещена, например, в [2]).

Особенно мало наблюдательных данных получено о короткоживущих эволюционных стадиях массивных звезд в условиях низкой металличности: например, о звездах LBV и низкометаллических WR. На сегодняшний день только несколько десятков кандидатов в LBV являются подтвержденными, и большая их часть находится в нашей галактике и в галактиках Местной Группы ([22]). Таким образом, каждый новый найденный кандидат в низкометаллическую звезду LBV представляет большой интерес в контексте звездной эволюции. Несмотря на то, что звезды WR являются более многочисленными, чем LBV, (~ 700 WR звезд известно в Млечном Пути [23], еще ~ 150 и ~ 200 в условиях высокой металличности известны в галактиках M31 и M33 [24], ~ 150 WR звезд в LMC [25], 12 в SMC [26]), они представляют большой

наблюдательный интерес в контексте настоящей работы в связи со значительным воздействием на МЗС. Найденные звезды WR в условиях низкой металличности иногда приводят к пересмотру существующих представлений в области звездной эволюции. Так, например, звездный ветер одной из немногочисленных открытых звезд WO, находящейся в низкометаллической галактике IC 1613, оказался сильнее, чем предсказывали модели для данного показателя металличности [2].

Поиск массивных звезд с разным показателем металличности зачастую проводят в близких карликовых галактиках (< 20 Мпк), представляющих собой уникальную лабораторию для изучения формирования массивных звезд, их эволюции и взаимодействия с МЗС. Благодаря отсутствию в них крупномасштабной спиральной структуры в сочетании с малым гравитационным потенциалом и толстым газовым диском, в таких галактиках можно наблюдать развитие как протяженных газовых структур, связанных с жизнедеятельностью одиночных массивных звезд или небольших ассоциаций, так и образование оболочек и сверхоболочек, образованных несколькими поколениями массивных звезд, что зачастую представляет сложности в более крупных галактиках [27; 28]. С помощью современных инструментов пространственно разрешаются отдельные области H II на расстояниях до 20 Мпк ([13]). В случае наиболее близких галактик зачастую детально прослеживается морфология ионизованного газа вокруг отдельных звезд, что дает возможность оценить возраст и скорость расширения оболочек, сделать выводы об эволюционном пути ионизовавшей оболочку звезды (см., например, [29; 30]). Кроме того, показатель металличности близких карликовых галактик варьируется в широких пределах: от металличности, близкой к солнечной (как, например, в галактике IC 225, [31]), до величин в 5-10 раз меньше (как в IC 1613, NGC 4068, NGC 2366, исследуемых в настоящей работе), и доходя до нескольких процентов от солнечной (как в случае DDO 68 [32] и I Zwicky 18 [33]).

В рамках настоящей работы было детально изучено взаимодействие массивных звезд с окружающей МЗС в нескольких карликовых галактиках: NGC 2366, NGC 4068 и IC 1613. Все изученные галактики находятся в близкой Вселенной (расстояние 0,7; 3,3; 4,4 Мпк до IC 1613, NGC 2366 и NGC 4068 соответственно) и демонстрируют пониженное содержание тяжелых элементов ($Z \sim 0.1 Z_{\odot}$). Объединяет выборку галактик также и то, что все они испыты-

вают вспышку звездообразования, а значит в них возможно наблюдение массивных звезд, как еще не успевших проэволюционировать, так и находящихся на короткоживущих и редких эволюционных стадиях.

Целью настоящей работы является изучение взаимодействия массивных звёзд с окружающим межзвёздным веществом в близких карликовых галактиках с низким содержанием тяжёлых элементов.

Исследование направлено на установление природы найденных по морфологии и кинематики объектов, потенциально связанных с массивными звездами на разных стадиях эволюции: слабых эмиссионных оболочек ионизованного газа, объектов, демонстрирующих пекулярную кинематику, известных кандидатов в WR и SNR. В работе всесторонне исследуется влияние массивных звезд на окружающий газ: химическое обогащение МЗС, ионизация окружающего газа посредством излучения, возможный вклад ударных волн. Работа основана на комплексном анализе фотометрических и спектроскопических наблюдений, включая узкополосную фотометрию, длиннощелевую и 3D-спектроскопию, с последующим сопоставлением наблюдаемых характеристик с теоретическими оценками и результатами проведенного спектрального моделирования.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. получение фотометрических и спектроскопических данных на 6-метровом телескопе БТА CAO и 2,5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ; обработка полученных данных;
2. поиск дополнительной информации об исследуемых объектах в архивных данных наземных и космических телескопов (MUSE/VLT, WFC/HST, VLA, XMM-Newton, Swift/XRT);
3. ограничение параметров пекулярной туманности, найденной в галактике NGC 4068, с опорой на наблюдательные данные; проведение спектрального моделирования ионизирующей массивной звезды и окружающей туманности в согласии с проведенными оценками параметров;
4. анализ проведенных фотометрии и спектроскопии слабых ионизованных оболочек, найденных в галактике IC 1613; определение их природы на основании проведенного анализа;

5. определение природы известных кандидатов в звезды WR в галактике IC 1613; классификация объектов на основе данных спектроскопии; поиск новых кандидатов в проэволюционировавшие массивные звезды по данным спектрографа MUSE/VLT;
6. исследование мелкомасштабной кинематики газа в галактике NGC 2366 с помощью данных интерферометрии Фабри-Перро; определение природы найденных кинематически выделяющихся источников;
7. проведение химического анализа МЗС по всему полю галактики NGC 2366 с помощью данных длиннощелевой спектроскопии;

Методология и методы исследования

Теоретико-методологической базой диссертации являются работы [34], [35] (BPT-диаграммы), [36] (фотоионизационные модели, полученные для газа с пониженной металличностью), [37; 38] (кривые поглощения).

Для поиска областей газа с высокой дисперсией скоростей были использованы $I-\sigma$ диаграммы, описанные в работе [39].

В работе использовались классические методы оценки температуры и содержания тяжелых элементов: [40] (T_e метод), [41] (метод сильных линий). Оценки физических параметров ионизованного газа в галактиках NGC 4068 и NGC 2366 получены с использованием пакета `pyneb` [42] и поправочных коэффициентов из работ [43], [44].

Модельные треки звезд, используемые для определения природы объекта в галактике NGC 4068, описаны в работах [19] и [18]. Модели туманности, ионизованной звездой, были получены с помощью кода `Cloudy` [45], версия 17.01 [46], и пакета `pyCloudy` [47]. Спектры ионизирующей звезды были смоделированы с помощью кода `cmfgen` [48].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Найденные новые массивные звезды с эмиссионными линиями в близких низкометаллических галактиках являются кандидатами в звезды Вольфа-Райе (2 кандидата в WR) и в яркие голубые переменные (2 кандидата в LBV). На основании спектральных и фотометрических данных показано, что пять предложенных кандидатов в звезды Вольфа-Райе в галактике IC 1613 не являются звездами Вольфа-Райе.
2. Пекулярный объект J120406.8 +523600 в галактике NGC 4068 хорошо описывается моделью туманности, ионизованной массивной звездой типа WR, обогащающей окружающую межзвездную среду азотом.
3. Межзвездная среда вокруг отдельных массивных звезд в карликовых низкометаллических галактиках NGC 4068 и NGC 2366 локально обогащена тяжелыми элементами (азотом и кислородом соответственно).
4. В межзвездной среде галактики NGC 2366 распределение кислорода неоднородно. Локальное обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами может быть связано с истечением газа из области Mrk 71 под действием массивного скопления.

Научная новизна:

1. Большинство наблюдательных данных (80%), используемых в работе, являются оригинальными. Их анализ до этого не проводился и они не были нигде опубликованы;
2. Впервые обнаружена туманность с повышенной дисперсией скоростей в галактике NGC 4068 и проведено моделирование ее спектра. На основании проведенной работы объяснена вероятная природа туманности;
3. Для галактики IC 1613 впервые обнаружено несколько слабых оболочек в данных узкополосной фотометрии в линии H α . Проведен анализ данных оболочек и выявлены источники ионизации. Показано, что одна из оболочек, демонстрирующая рентгеновский точечный источник, может являться остатком сверхновой;

4. Впервые однозначно определен статус 5 кандидатов в звезды WR в галактике IC 1613. Показано, что звезды не относятся к типу WR; Найдены два новых кандидата в звезды LBV;
5. Впервые проведено исследование мелкомасштабной кинематики по всему полю галактики NGC 2366, что позволило обнаружить 20 объектов с повышенной дисперсией скоростей в линии H α ; данный метод позволил обнаружить два новых кандидата в остатки сверхновых и один новый кандидат в звезду WR;
6. Впервые проведена прямая оценка металличности с помощью T_e-метода для 15 областей галактики NGC 2366 за пределами области Mrk 71; обнаружены вариации содержания кислорода по полю галактики, вероятно указывающие на обогащение МЗС тяжелыми элементами посредством истечения газа из области Mrk 71;

Практическая значимость работы связана со значительным недостатком наблюдательных данных о последовательности эволюционных стадий и параметрах массивных звезд при пониженном содержании металлов в родительской среде галактик. Модели эволюции массивных звезд демонстрируют значительное расхождение при изменении начальных параметров звезд. Ввиду неопределенности этих параметров, на сегодняшний день однозначный выбор в пользу единственного типа моделей сделать невозможно. Так как массивные звезды оказывают решающее влияние на эволюцию газовой среды галактик, уточнение моделей эволюции звезд (и как следствие, их ключевых параметров на разных стадиях), является необходимым для понимания эволюции газовой среды галактик, ее химического обогащения, процессов обратной связи между звездами и газом, а также галактическими процессами, имеющими решающее значение в картине эволюции Вселенной (например, параметров утечки Лайман квантов). Таким образом, поиск кандидатов в массивные звезды на поздних стадиях эволюции (таких как WR, LBV), их моделирование и оценка параметров, также как и поиск остатков сверхновых в галактиках, бедных металлами, имеет большую значимость в контексте выбора наиболее достоверных эволюционных моделей звезд и понимания эволюции карликовых галактик.

Проводимые исследования напрямую связаны с изучением эволюции галактик в ранней вселенной, так как свойства исследуемых объектов – близ-

ких низкометаллических галактик – частично схожи со свойствами ранних галактик: а именно, сходны пониженная металличность, доминирование молодых звездных популяций, компактная морфология и нерегулярная структура. Например, галактика NGC 2366, изучаемая в данной работе, является локальным аналогом галактик типа Green Pea ($z \sim 0,2$), вероятно сходных с галактиками, ответственными за реионизацию ранней Вселенной. Изучение локальных аналогов далеких галактик может пролить свет на процессы звездообразования, выброса газа из галактик, реионизации и химической эволюции. Глубокое понимание данных процессов необходимо для построения адекватных моделей эволюции галактик и моделирования процессов, происходящих в ранней Вселенной.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием общепринятых зависимостей и калибровок.

Значение E_{B-V} для спектров оценивалось с помощью бальмеровского декремента, что является общепринятым подходом при анализе эмиссионных областей H II. В тех случаях, когда была возможна только оценка Галактического покраснения, мы использовали значения E_{B-V} из работы [49], полученное с помощью пакета dustmaps [50]. Затем мы использовали кривую из работы [37], параметризованную как описано в [38].

Линии, разделяющие области фото- и ударной ионизации, используемые в данной работе, взяты из классических работ [34] и [35]; в настоящий момент именно данные калибровки считаются стандартными. Для анализа областей H II галактик IC 1613 и NGC 2366 также использованы модели из работы [36], что обосновано сильной зависимостью положения разделительных линий на BPT-диаграмме от металличности исследуемых областей.

Модельные треки звезд из работы [18] наиболее часто используются при моделировании массивных звезд; мы также использовали треки из работы [19], в которых содержание тяжелых элементов иначе шкалируется на низкую металличность, что позволяет получить массивные звезды WR для металличности $0,1Z_{\odot}$, которые невозможно получить в случае использования модельной сетки из [18]. Модели изучаемой туманности в галактике NGC 4068 были получены с помощью фотоионизационного кода Cloudy [45; 46] с использованием звезд, смоделированных с помощью кода cmfgen [48], как входного

параметра. Оба кода широко используются в области изучения массивных звезд, окруженных туманностями.

Те-метод оценки температуры и содержания тяжелых элементов, используемый в работе, является наиболее достоверными, что показано в работе [40]. Мы также использовали эмпирическую S-калибровку для определения металличностей областей: [41]. Данная калибровка наиболее точно совпадает с T_e -методом, несмотря на больший по сравнению с T_e -методом разброс получаемых значений.

Апробация работы Результаты диссертационной работы опубликованы в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index», международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Основные результаты работы лично докладывались соискателем на следующих мероприятиях:

1. Международная конференция «15th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics», 9-13 июня 2025 («Metallicity and small-scale kinematics in local starforming galaxy NGC 2366 »);
2. Международная конференция «XXXII IAU General Assembly», Кейптаун, ЮАР, 6-15 августа 2024 («Diffuse emission sources and massive stars in the dwarf metal-poor galaxy IC 1613 », стендовый доклад);
3. Международная конференция «XX Serbian astronomical conference», Сербская Академия Наук и Искусств, Белград, Сербия, 16-20 октября 2023 («Nature of the diffuse emission sources in the HI supershell in the galaxy IC 1613»);
4. Международная конференция «IAU Symposium 361», Балликоннелл, Ирландия, 8-13 мая 2022 («Metal-poor Wolf-Rayet star enriching the ISM by nitrogen in the nearby galaxy NGC 4068», стендовый доклад);
5. Международная конференция «XIII Serbian Conference on spectral line shapes in astrophysics», Онлайн, Сербия, 23-27 августа 2021 («CLOUDY model of peculiar emission nebula in low-metallicity galaxy NGC 4068»);

6. Международная конференция «Идеи С.Б.Пикельнера и С.А.Каплана и современная астрофизика», ГАИШ, Москва, Россия, 8-12 февраля 2021 («Моделирование туманности с peculiarным эмиссионным спектром в низкометаллической галактике NGC 4068»);
7. Семинар ИКИ РАН, март 2024 («Взаимодействие массивных звезд с межзвездной средой в карликовых низкометаллических галактиках»);
8. Семинар ИТЭФ (ККТЭФ КИ), февраль 2023 («Исследование массивных звезд в карликовых галактиках с низкой металличностью»);

Личный вклад

В работах 1), 2), 3) вклад автора составляет 60, 80 и 45% соответственно. В работе 1) автор принимал участие в постановке задачи, получении наблюдательных данных, построении моделей туманности с помощью кода CLOUDY, равно как и в анализе полученных данных и формулировке результатов. В работе 2) автор принимал участие в обработке и анализе данных, формулировке результатов. В работе 3) автором был проведен анализ данных длинноцелевой спектроскопии, химический анализ межзвездной среды галактики и анализ кинематики области Mrk 71. Во всех приведенных работах вклад автора в работу над текстом статей и формулировку основных выводов является решающим.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации: 148 страниц текста с 34 рисунками и 10 таблицами. Список литературы содержит 202 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность и научная значимость диссертационной работы, дается краткий обзор современных представлений о массивных звездах на разных стадиях эволюции и их влиянии на межзвездную среду галактик, формулируются цели настоящего исследования, приводится перечень положений, выносимых на защиту.

Первая глава посвящена описанию теоретико-методологической базы, на основе которой выполнена работа. В главе описаны основные дан-

ные, используемые при проведении исследований: узкополосная фотометрия, длиннощелевые и 3D-спектры, полученные на приборах ТДС/КГО МГУ, SCORPIO-2/САО РАН, а также архивные многоволновые данные, полученные на наземных и космических телескопах. Далее в главе изложены наиболее важные методы анализа наблюдательных данных: методы определения природы ионизации газовых оболочек, оценки параметров МЗС и энергетического баланса между массивными звездами и МЗС.

Вторая глава посвящена моделированию пекулярной туманности, найденной в галактике NGC 4068, и определению природы ее ионизации.

Анализируя кинематику ионизованного газа в галактике NGC 4068 по данным 3D-спектроскопии, мы обнаружили компактную туманность, имеющую одновременно высокую поверхностную яркость и большую дисперсию лучевых скоростей в линии $H\alpha$. Как ранее было показано (например, в работе [39]), сочетание таких характеристик указывает на проэволюционировавшие звезды (например WR, LBV) или расширяющиеся остатки сверхновых. Проведенная нами длиннощелевая спектроскопия на приборах SCORPIO-2/БТА и ТДС/КГО показала, что обнаруженный объект демонстрирует очень необычный спектр со слабыми линиями $[S\ II]\lambda 6716,6731\ \text{\AA}$ и самым высоким отношением линий $[N\ II]\lambda 6583/H\alpha$ в галактике (рис. 1). Мы провели моделирование спектров возможных источников ионизации – массивных звезд WR и BSG, находящихся на поздних эволюционных стадиях – с помощью кода `smfgen`, и затем, опираясь на звездные модели, мы построили модель спектра туманности с помощью фотоионизационного кода `CLOUDY` с целью выяснения природы этого объекта.

В результате проведенных исследований было показано, что спектр обнаруженной туманности успешно воспроизводится в предположении, что туманность ионизована массивной звездой WR ($M_{\text{init}}=80M_{\odot}$), выбрасывающей в окружающую МЗС большое количество азота.

Третья глава

Третья глава посвящена исследованию физических характеристик слабых источников излучения ионизованного газа, ассоциированных с крупномасштабной HII-сверхоболочкой в неправильной галактике IC 1613. Объектом анализа выступают диффузные H II-области и оболочечные структуры, локализованные на периферии основной области звездообразования. Одной из це-

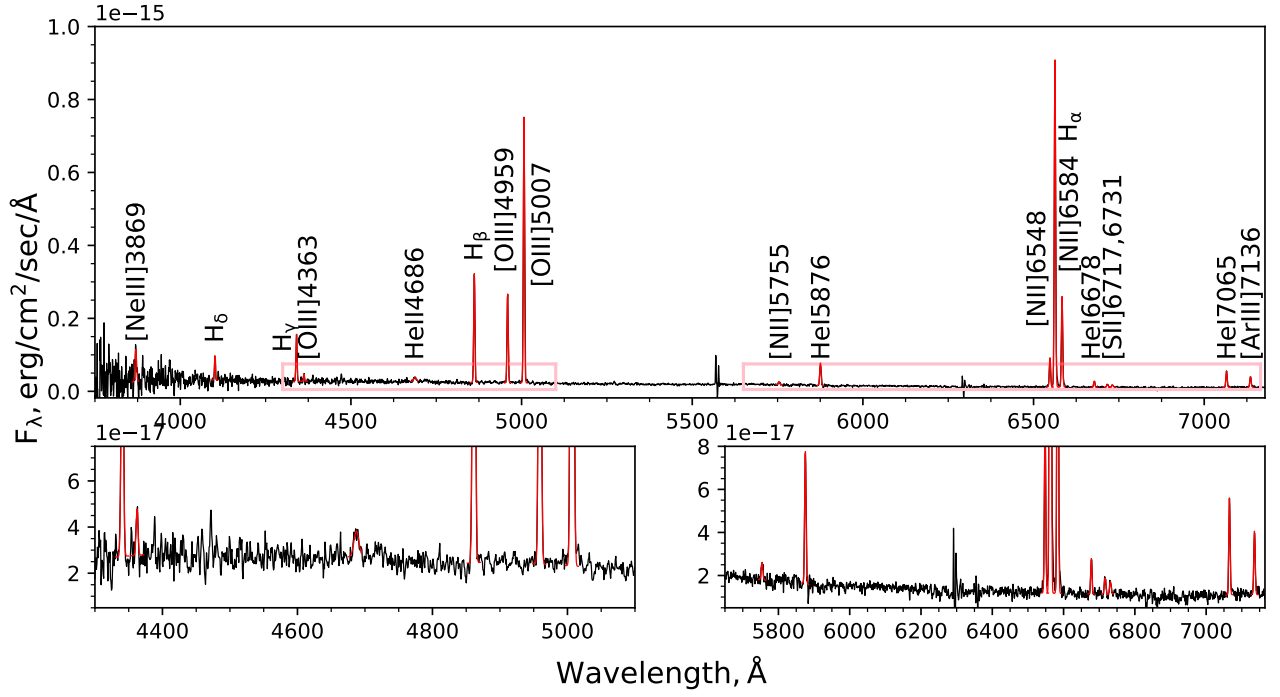


Рис. 1 — Спектр пекулярной туманности в галактике NGC 4068, полученный на спектрографе SCORPIO-2/БТА.

лей работы является определение природы выявленных слабых эмиссионных структур и оценка вклада различных механизмов возбуждения газа, включая фотоионизацию звёздами ранних спектральных типов и ударное возбуждение, ассоциированное с остатками сверхновых или другими высокоэнергетичными источниками.

Еще одной целью работы является уточнение классификации ранее обнаруженных кандидатов в звёзды Вольфа–Райе, предложенных на основе узкополосной фотометрии в работе [51], на основе спектральных и узкополосных фотометрических данных. Кроме того, мы обнаружили два объекта с эмиссионными линиями типа P Cug в спектре H α и обсуждаем их возможную классификацию.

Четвертая глава

Четвертая глава посвящена химическому и кинематическому анализу ионизованного газа в близкой низкометаллической галактике NGC 2366, а также поиску массивных звезд на поздних эволюционных стадиях и остатков сверхновых в этой галактике. Галактика представляет значительный интерес как локальный аналог галактик типа Green Pea, расположенных на красных смещениях $z \sim 0.2$, в свою очередь возможно имеющих сходство с далекими галактиками, реионизовавшими раннюю Вселенную.

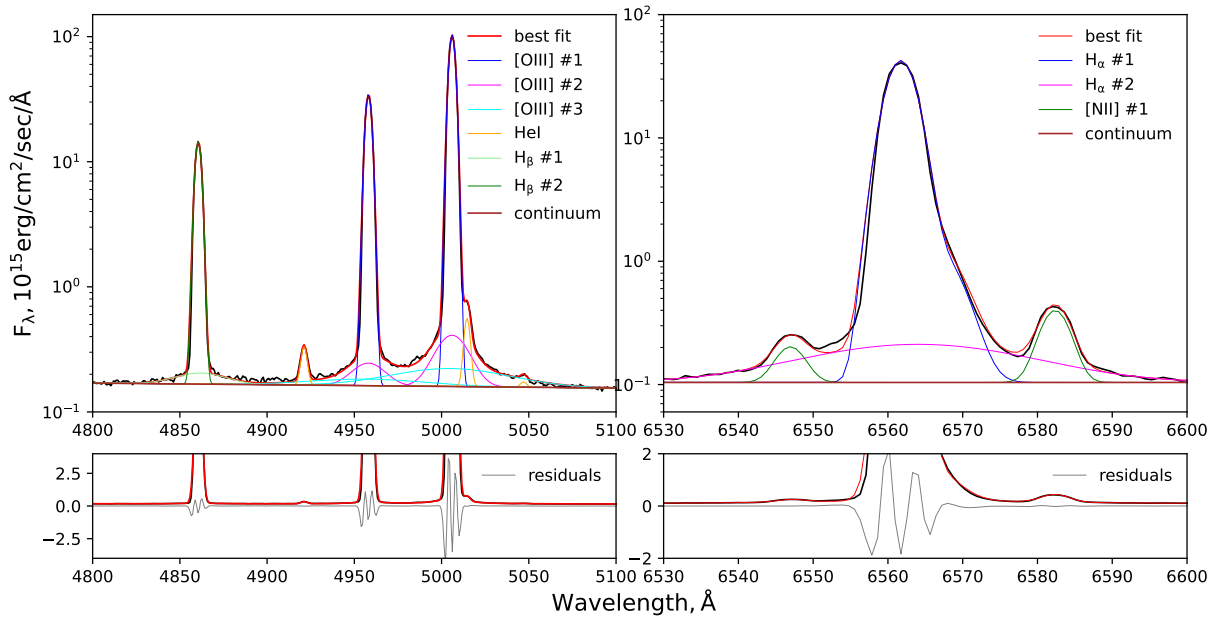


Рис. 2 — Спектр центральной части области звездообразования Mrk 71 в галактике NGC 2366 вблизи спектральных линий $H\alpha$ и $[O III]$ (получен на SCORPIO-2/БТА). На двух верхних панелях представлены спектры в логарифмическом масштабе (показаны чёрным цветом), на которые наложены наилучшие модельные аппроксимации (красным) и их отдельные компоненты. На нижних панелях показаны те же области спектра в линейном масштабе с учётом ошибок (серым цветом).

До настоящей работы наиболее исследованной областью галактики NGC 2366 была область с доминирующим звездообразованием Mrk 71, остальные же области галактики оставались практически неисследованными. В данной диссертации проводится оценка металличности по всему полю галактики на основе данных длиннощелевой спектроскопии, полученной на 6-м телескопе БТА САО РАН. Мы оценили содержание кислорода и азота с помощью Те метода для 15 галактических H II-областей, а также содержание кислорода с помощью S-калибровки для 23 областей. Проведенный анализ позволил выявить неоднородный характер химического обогащения межзвездной среды галактики. Особое внимание уделено спектральному анализу самой яркой области галактики – Mrk 71 (рис.2), демонстрирующей сложный многокомпонентный спектр.

Дополнительной задачей был анализ мелкомасштабной кинематики ионизованного газа в галактике NGC 2366. Для этого были исследованы данные 3D-спектроскопии в линии $H\alpha$, полученные на интерферометре Фабри-

Перро, установленном на 6-м телескопе БТА. Проведенный анализ позволил выявить 20 галактических областей с возмущенной кинематикой. Далее природа найденных источников определялась на основе анализа кинематических, фотометрических и длиннощелевых данных.

В **заключении** приведены основные результаты исследования трех карликовых низкометаллических галактик. Перечислены найденные кандидаты в массивные звезды на поздних эволюционных стадиях, а также в остатки сверхновых. Сделан вывод о значительном химическом и кинематическом влиянии массивных звезд на окружающую межзвездную среду близких карликовых галактик.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index», международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия:

- (a1) Yarovova Anastasiya, Egorov Oleg, Moiseev Alexei, Maryeva Olga / Unveiling the nitrogen-rich massive star in the metal-poor galaxy NGC 4068 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, том 518, № 2, с. 2256-2272, 2023. EDN: NJJXTJ. Импакт-фактор 1.03 (JCI). Личный вклад автора 60%. Объем 2.08 печатных листов.
- (a2) Yarovova Anastasiya, Moiseev Alexei, Gerasimov Ivan, Vučetić Milica, Egorov Oleg, Ilić Dragana, Mereminskiy Ilya, Pakhomov Yury, Sholukhova Olga / Nature of the diffuse emission sources in the H i supershell in the galaxy IC 1613 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, том 529, № 4, с. 4930-4946, 2024. EDN: WXOMZU. Импакт-фактор 1.03 (JCI). Личный вклад автора 80%. Объем 1.96 печатных листов.
- (a3) Yarovova Anastasiya, Gerasimov Ivan, Egorov Oleg, Moiseev Alexei, Vasiliev Konstantin, Lozinskaya Tatiana / Chemical abundances and small-scale gas kinematics in the local star-forming galaxy NGC 2366 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, том 541, № 4, с. 3913–3931, 2025. Импакт-фактор 1.03 (JCI). DOI:

Список литературы

1. *Strömgren B.* The Physical State of Interstellar Hydrogen. // — 1939. — Май. — Т. 89. — С. 526.
2. Massive stars in extremely metal-poor galaxies: a window into the past / M. Garcia [и др.] // *Experimental Astronomy*. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 51, № 3. — С. 887—911.
3. Predictions for mass-loss rates and terminal wind velocities of massive O-type stars / L. E. Muijres [и др.] // — 2012. — ЯНВ. — Т. 537. — A37.
4. Stellar Evolution in the Upper HR Diagram / R. Hirschi [и др.] // *Hot and Cool: Bridging Gaps in Massive Star Evolution*. Т. 425 / под ред. С. Leitherer [и др.]. — ИЮНЬ 2010. — С. 13. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
5. *Martins F., Palacios A.* A comparison of evolutionary tracks for single Galactic massive stars // — 2013. — Дек. — Т. 560. — A16.
6. *Sander A. A. C., Vink J. S., Hamann W. .-.-R.* Driving classical Wolf-Rayet winds: a Γ - and Z-dependent mass-loss // — 2020. — ЯНВ. — Т. 491, № 3. — С. 4406—4425.
7. Connecting stellar and galactic scales: Energetic feedback from stellar wind bubbles to supernova remnants / Y. A. Fichtner [и др.] // — 2024. — Окт. — Т. 690. — A72.
8. Before the first supernova: combined effects of H II regions and winds on molecular clouds / J. E. Dale [и др.] // — 2014. — ИЮЛЬ. — Т. 442, № 1. — С. 694—712.
9. *Giuliani A., Cardillo M.* Supernova Remnants in Gamma Rays // *Universe*. — 2024. — Май. — Т. 10, № 5. — С. 203.
10. The supergiant shell with triggered star formation in the dwarf irregular galaxy IC 2574: neutral and ionized gas kinematics / O. V. Egorov [и др.] // — 2014. — Окт. — Т. 444, № 1. — С. 376—391.

11. Complexes of triggered star formation in supergiant shell of Holmberg II / O. V. Egorov [и др.] // . — 2017. — ЯНВ. — Т. 464, № 2. — С. 1833—1853.
12. *Martin C. L., Kobulnicky H. A., Heckman T. M.* The Metal Content of Dwarf Starburst Winds: Results from Chandra Observations of NGC 1569 // . — 2002. — АВГ. — Т. 574, № 2. — С. 663—692.
13. *Schinnerer E., Leroy A. K.* Molecular Gas and the Star-Formation Process on Cloud Scales in Nearby Galaxies // . — 2024. — СЕНТ. — Т. 62, № 1. — С. 369—436.
14. *Vink J. S., de Koter A., Lamers H. J. G. L. M.* Mass-loss predictions for O and B stars as a function of metallicity // A&A. — 2001. — АПР. — Т. 369. — С. 574—588.
15. New predictions for radiation-driven, steady-state mass-loss and wind-momentum from hot, massive stars. II. A grid of O-type stars in the Galaxy and the Magellanic Clouds / R. Björklund [и др.] // . — 2021. — АПР. — Т. 648. — A36.
16. Low-metallicity massive single stars with rotation. Evolutionary models applicable to I Zwicky 18 / D. Szécsi [и др.] // . — 2015. — СЕНТ. — Т. 581. — A15.
17. *Maeder A., Meynet G.* Stellar evolution with rotation. VII. . Low metallicity models and the blue to red supergiant ratio in the SMC // . — 2001. — ИЮЛЬ. — Т. 373. — С. 555—571.
18. Grids of stellar models with rotation. III. Models from 0.8 to 120 $M_{\odot}$ at a metallicity $Z = 0.002$ / C. Georgy [и др.] // A&A. — 2013. — ОКТ. — Т. 558. — A103.
19. Stromlo Stellar Tracks: non-solar scaled abundances for massive stars / K. Grasha [и др.] // arXiv e-prints. — 2021. — ЯНВ. — arXiv:2101.01197.
20. Low-metallicity massive single stars with rotation. Evolutionary models applicable to I Zwicky 18 / D. Szécsi [и др.] // A&A. — 2015. — СЕНТ. — Т. 581. — A15.
21. Grids of stellar models with rotation. IV. Models from 1.7 to 120 $M_{\odot}$ at a metallicity $Z = 0.0004$ / J. H. Groh [и др.] // . — 2019. — ИЮЛЬ. — Т. 627. — A24.

22. *Richardson N. D., Mehner A.* The 2018 Census of Luminous Blue Variables in the Local Group // Research Notes of the American Astronomical Society. — 2018. — Июль. — Т. 2, № 3. — С. 121.
23. Search for new Galactic Wolf-Rayet stars using Gaia DR3: I. Candidate selection and the follow-up of the bright sample / L. Mulato [и др.] //. — 2025. — Март. — Т. 695. — A227.
24. *Shenar T.* Wolf-Rayet stars // arXiv e-prints. — 2024. — Окт. — arXiv:2410.04436.
25. *Neugent K. F., Massey P., Morrell N.* A Modern Search for Wolf-Rayet Stars in the Magellanic Clouds. IV. A Final Census //. — 2018. — Авг. — Т. 863, № 2. — С. 181.
26. An absence of binary companions to Wolf-Rayet stars in the Small Magellanic Cloud: Implications for mass loss and black hole masses at low metallicities / A. Schootemeijer [и др.] //. — 2024. — Сент. — Т. 689. — A157.
27. *Brinks E., Walter F.* The Violent Interstellar Medium in Dwarf Galaxies: Atomic Gas // Magellanic Clouds and Other Dwarf Galaxies / под ред. Т. Richtler, J. M. Braun. — Дек. 1998. — С. 1–10.
28. The Galactic Distribution of Large H I Shells / N. M. McClure-Griffiths [и др.] //. — 2002. — Окт. — Т. 578, № 1. — С. 176–193.
29. *Lozinskaya T. A.* The interaction of a stellar wind with the ISM: The interstellar environments of WR stars // Astronomical and Astrophysical Transactions. — 1996. — Янв. — Т. 11, № 3. — С. 307–315.
30. Interstellar Medium Surrounding the WO Star in the Galaxy IC 1613: New Optical and Radio Observations / T. A. Lozinskaya [и др.] // Astronomy Reports. — 2001. — Июнь. — Т. 45, № 6. — С. 417–427.
31. *Peeples M. S., Pogge R. W., Stanek K. Z.* Outliers from the Mass-Metallicity Relation. I. A Sample of Metal-Rich Dwarf Galaxies from SDSS //. — 2008. — Окт. — Т. 685, № 2. — С. 904–914.
32. Chemical abundances and radial velocities in the extremely metal-poor galaxy DDO 68 / F. Annibali [и др.] //. — 2019. — Янв. — Т. 482, № 3. — С. 3892–3914.

33. Spatially resolved integral field spectroscopy of the ionized gas in IZw18 / C. Kehrig [и др.] //. — 2016. — Июль. — Т. 459, № 3. — С. 2992—3004.
34. Theoretical Modeling of Starburst Galaxies / L. J. Kewley [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2001. — Июль. — Т. 556. — С. 121—140.
35. The host galaxies of active galactic nuclei / G. Kauffmann [и др.] // MNRAS. — 2003. — Дек. — Т. 346. — С. 1055—1077.
36. BOND: Bayesian Oxygen and Nitrogen abundance Determinations in giant H II regions using strong and semistrong lines / N. Vale Asari [и др.] // MNRAS. — 2016. — Авг. — Т. 460, № 2. — С. 1739—1757.
37. *Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S.* The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction // The Astrophysical Journal. — 1989. — Окт. — Т. 345. — С. 245—256.
38. *Fitzpatrick E. L.* Correcting for the Effects of Interstellar Extinction // PASP. — 1999. — Янв. — Т. 111. — С. 63—75.
39. *Moiseev A. V., Lozinskaya T. A.* Ionized gas velocity dispersion in nearby dwarf galaxies: looking at supersonic turbulent motions // MNRAS. — 2012. — Июнь. — Т. 423, № 2. — С. 1831—1844.
40. *Pilyugin L. S., Grebel E. K.* New calibrations for abundance determinations in H II regions // MNRAS. — 2016. — Апр. — Т. 457. — С. 3678—3692.
41. On the composition of H II regions in southern galaxies - I. NGC 300 and 1365. / B. E. J. Pagel [и др.] // MNRAS. — 1979. — Окт. — Т. 189. — С. 95—113.
42. *Luridiana V., Morisset C., Shaw R. A.* PyNeb: a new tool for analyzing emission lines. I. Code description and validation of results //. — 2015. — Янв. — Т. 573. — A42.
43. The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey / Y. I. Izotov [и др.] // A&A. — 2006. — Март. — Т. 448, № 3. — С. 955—970.
44. *Garnett D. R.* Electron Temperature Variations and the Measurement of Nebular Abundances //. — 1992. — Апр. — Т. 103. — С. 1330.

45. CLOUDY 90: Numerical Simulation of Plasmas and Their Spectra / G. J. Ferland [и др.] // PASP. — 1998. — Июль. — Т. 110, № 749. — С. 761—778.
46. The 2017 Release Cloudy / G. J. Ferland [и др.] // rmxaa. — 2017. — Окт. — Т. 53. — С. 385—438.
47. *Morisset C.* pyCloudy: Tools to manage astronomical Cloudy photoionization code. — Апр. 2013.
48. *Hillier D. J., Miller D. L.* The Treatment of Non-LTE Line Blanketing in Spherically Expanding Outflows // The Astrophysical Journal. — 1998. — Март. — Т. 496. — С. 407—427.
49. Planck 2013 results. XI. All-sky model of thermal dust emission / Planck Collaboration [и др.] // A&A. — 2014. — Нояб. — Т. 571. — A11.
50. *Green G.* dustmaps: A Python interface for maps of interstellar dust // The Journal of Open Source Software. — 2018. — Июнь. — Т. 3, № 26. — С. 695.
51. *Armandroff T. E., Massey P.* Wolf-Rayet stars in NGC 6822 and IC 1613. // The Astrophysical Journal. — 1985. — Апр. — Т. 291. — С. 685—692.